简化 FMM 算法在束流剖面测量中的应用

章洪博[1,2]，魏晓娟[1,†]，李敏[2,3,†]，毛瑞士[2,3]，唐凯[2]，冯永春[2]

（1.西北民族大学，兰州 730030；
2.中国科学院近代物理研究所，兰州，730000；
3.中国科学院大学，北京 100049）

摘要：加速器中利用荧光靶系统测量束流横向剖面，为进一步提高系统测量的准确度，本文提出了一种利用简化快速行进算法（Fast Matching Method，FMM）填充荧光靶标定线的方法，使填充后的荧光靶图像更真实地反映束流剖面信息。论文首先利用 Matlab 生成模拟荧光靶图像，对比分析了算法处理前后的模拟图像束流剖面参数，仿真结果表明经过处理后的模拟图像，其结构相似性（Structural Similarity Index measure，SSIM）更接近 1、均方误差（Mean Square Error，MSE）更小。最后，利用医用重离子加速器 HIMM（Heavy Ion Medical Machine）现场采集的荧光靶图像进行验证。结果表明，HIMM 现场采集的图像经处理后，剖面测量结果接近评估值。本研究结果为后续束流横向剖面参数算法的 FPGA 算法加速提供了依据。

关键词：束流剖面测量；简化 FMM 算法；荧光靶；标定线填充；图像处理

中图分类号：TL56，TP751　　**文献标志码：A**　　**DOI：**

1　引言

医用重离子加速器 HIMM 是由中国科学院近代物理研究所和兰州科近泰基新技术有限责任公司研发制造、拥有自主知识产权的大型放疗设备[1-2]。在调束过程中，调束人员为及时了解束流状态信息，多采用简单、直接的荧光靶测量系统获取束流横向剖面参数。荧光靶靶片在安装前会采用石墨烤制技术刻制网格状标定线[3-5]，网格尺寸为 5mm*5mm，束流打在靶面上发出可见光，并由相机采集传输至处理器，调束人员通过网格标定线获取束流位置和剖面信息。相机帧率为 25 帧每秒，然而，上位机程序处理时间较长，无法满足实时监测束流抖动情况的需求，同时标定线会给束流剖面参数计算引入误差[6-7]，因此，为实现准确、快速的参数计算，同时考虑 FPGA 算法实现难易程度，本文采用简化 FMM 算法填充标定线并设计了计算光斑中心位置和标准差参数的图像处理流程，实现了标定线填充和束流剖面的测量，可为调束人员提高调束测量效率。

2　系统概述

荧光靶束流横向剖面测量系统（如图 1）主要由荧光靶探针、网络摄像机和上位机处理器等部分组成[8-9]，荧光靶是一种拦截式束流位置探测器，一般由 Al_2O_3 加荧光材料制成。

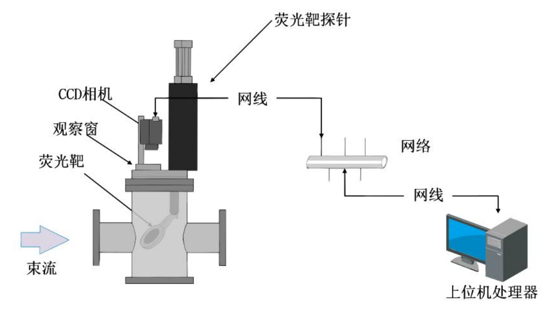


图 1 荧光靶束流横向剖面测量系统框图

收稿日期：2023-07-26;　　**修改日期：**2023-11-04
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(12205241)；甘肃省高等学校创新基金项目(2022B-074)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(31920220049 & 31920230138)；国家青年科学基金项目(11905075)
作者简介：章洪博(1999—)，男(汉族)，吉林长春人，硕士研究生，从事荧光靶图像处理算法研究；E-mail：zhb17393116106@163.com
通讯作者：魏晓娟，E-mail：258543923@qq.com; 李敏，E-mail：limin@impcas.ac.cn

束流与荧光靶相互作用会发出可见光，可见光的强度与束流的流强相关。网络摄像机内的传感器捕获荧光靶发出的光信号，将光信号转换为电信号，经网络传输至上位机，由上位机处理程序计算束流剖面参数。为提高系统测量的准确度，本文在该系统上设计图像处理算法[10]，并验证算法的可用性。

3　标定线图像填充

调束人员在调束时会根据上位机显示的荧光靶图像评价束流品质，但在束流剖面精确测量中，标定线的存在导致计算给出的剖面参数与实际参数存在一定误差，因此，需要利用数字图像修复（digital image inpainting）技术填充标定线，提高测量结果的准确性。数字图像修复是图像处理领域的重要分支之一，这一概念由 Bertalmio 等于 2000 年明确提出[11]，是指利用已知信息对图像中缺损区域进行填充的一种技术。在传统小尺度缺损修复方法中，Telea 提出的 FMM 相对其他算法实现相对简单、修复速度较快[12-13]，东南大学的闵溪青在此基础上，提出了一种简化的 FMM 算法[14]，与 FMM 相比，其保持了修复效果的同时减少了运算量，且算法实现更为简单。

3.1　简化 FMM 算法基本原理

简化 FMM 算法的原理图如图 2 所示，其中 Unknown 为待修复区域内部，该部分像素点的像素值未知；Known 为待修复区域外部，该部分像素点的像素值已知；q 点为待修复点，标记为 Unknown；N(q) 为以 q 点为中心的 4 邻域区域。简化 FMM 算法的修复流程如下：

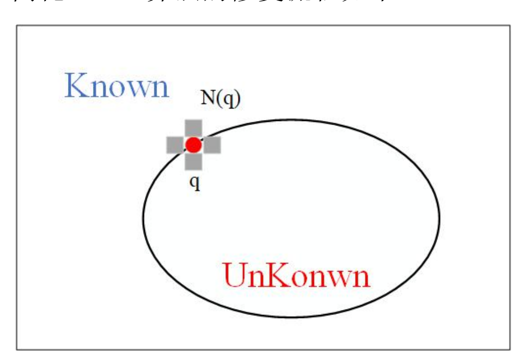


图 2 简化 FMM 算法原理图

1）遍历掩码图像（像素值只有 0 和 255），像素值为 0 的点待处理图像相应位置标记为 Known 的像素，像素值为 255 的点则标记为 Unknown 的像素。

2）遍历待修复区域，对于 Unknown 上的任一点 q，若点 q 的四邻域像素点均为 Unknown 标记，则跳过。若 p 的四邻域像素值存在 n 个标记为 Known 的点，根据式 1 填充点 q，填充后将 q 点标记为 Known。

3）更新待修复区域并返回步骤 2），直至待修复区域为空。

$$I(q)=\frac{\sum_{i\in N(q)} I(i)}{n} \tag{1}$$

3.2　修复前图像预处理

图像预处理的主要目的是提高输入图像质量和分割标定线生成掩码图。本文的预处理方法主要包括灰度化、滤波降噪、透视变换、自适应阈值分割、腐蚀膨胀等。图像处理流程图如图 3 所示。

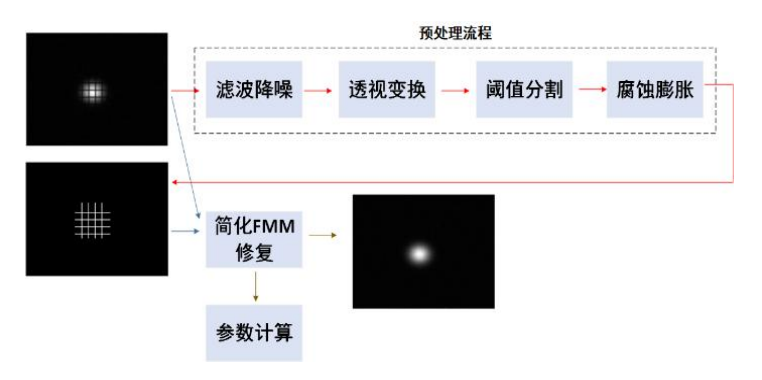
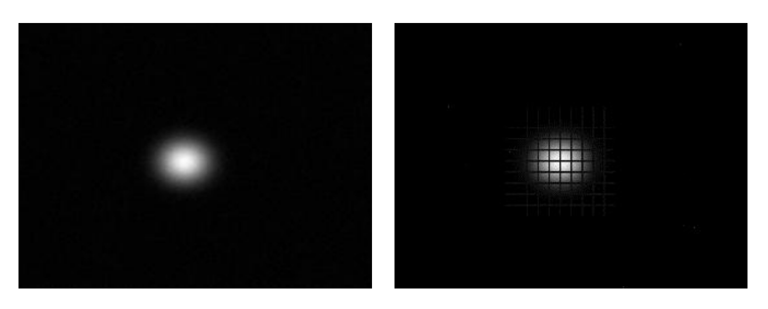


图 3 图像处理流程图

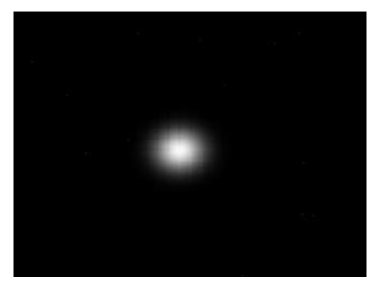
其中，灰度化操作可以减少数据量；中值滤波可以去除椒盐噪声的同时保护图像边缘信息；荧光靶图像除了噪声外还存在畸变，畸变来源在于系统真空管道的机械结构，荧光靶探针在安装时不能将相机、束流、靶面共线安装，靶面与束流和相机互成 45°角，加之现场安装时的误差，从而相机采集到的图像发生畸变，引入测量误差。透视变换通过变换前后的 4 对点确定一个变换矩阵，利用变换矩阵将一个像平面投影到指定平面，消除畸变；自适应阈值分割首先计算出 3x3 邻域块的算术平均值，再乘以一个缩小的系数作为局部阈值，可以分割出荧光靶图像中的标定线，生成掩码图像；腐蚀操作可以消除掩码图中的细小噪声；膨胀操作可以填充细小空洞，也可使掩码区域增大。预处理结束得到消除噪声的、没有畸变的荧光靶图像和标定线掩码图像，其作为简化 FMM 修复算法的输入图像，输出结果为修复后的荧光靶图像。

3.3 模拟荧光靶图像填充效果

采用 Matlab 语言编写代码生成 640*480 大小的光斑图像进行算法测试，光斑的垂直方向标准差为 25，中心坐标为 250；水平方向标准差为 30，中心坐标为 300。在光斑图像中加入噪声和标定线生成模拟的荧光靶图像，并将该图像作为透视变换后的荧光靶图像，模拟图像如图 4 所示。


图 4 模拟光斑图像（左）、模拟荧光靶图像（右）

通过简化 FMM 算法修复后的结果如图 5 所示。


图 5 填充模拟荧光靶图像效果图

引入结构相似性和均方误差客观指标衡量填充效果[15]。结构性相似 SSIM，是一种度量两幅图像相似度的指标。SSIM 算法主要比较两图像的亮度、对比度、结构三要素，然后对三要素加权乘积表示。式 2 为 SSIM 的简化公式：

$$\begin{cases} SSIM(x,y)=\dfrac{\left(2\mu_x\mu_y+c_1\right)\left(2\sigma_{xy}+c_2\right)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+c_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+c_2)} \\ \sigma_{xy}=\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu_x)(y_i-\mu_y) \end{cases} \tag{2}$$

已知有两幅图像 x 和 y，其中，μ为图像的像素平均值，σ^2为图像的像素方差，N 为图像像素总数，x_i和y_i分别代表图像该点的像素值，c_1和c_2是保证公式稳定性的常数，$c_1=(K_1L)^2$，$c_2=(K_2L)^2$，L 为图像的灰度级数，对于 8bit 的灰度图，L 取 255，K_1常取 0.01，K_2常取 0.03。SSIM 的范围是 0 到 1，两图像越相似其 SSIM 值越接近 1，当 SSIM 值为 1 时，表示两图像相同。

均方误差 MSE，是用来计算两幅图像每个点位置上的像素差异。其公式如式 3：

$$MSE=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}[I(i,j)-K(i,j)]^2 \tag{3}$$

已知有两幅图像 I 和 K，其中，m、n 为对应的像素总数，$I(i,j)$和$K(i,j)$分别代表两幅图在(i,j)处的像素值。在判断填充质量时，MSE 值越小代表修复效果越好。表 1 为采用简化 FMM 算法前后的指标对比，由表 1 可知，填充后的 SSIM 值更接近 1、MSE 更小，表示填充后的荧光靶图像与原光斑图像更加相似。

表 1 简化 FMM 算法前后指标对比

	SSIM	MSE
去标定线前	0.946	114.872
去标定线后	0.996	0.858

图 6、图 7 分别为标定线填充前后水平方向和垂直方向的分布，结合图 5-7 观察明显得出，填充后的荧光靶图像与原光斑图像分布更近似。

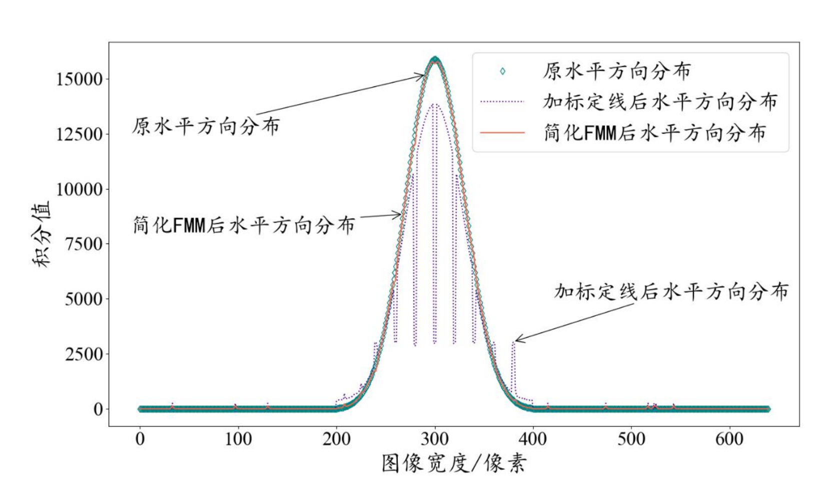


图 6 填充前后水平方向分布折线图

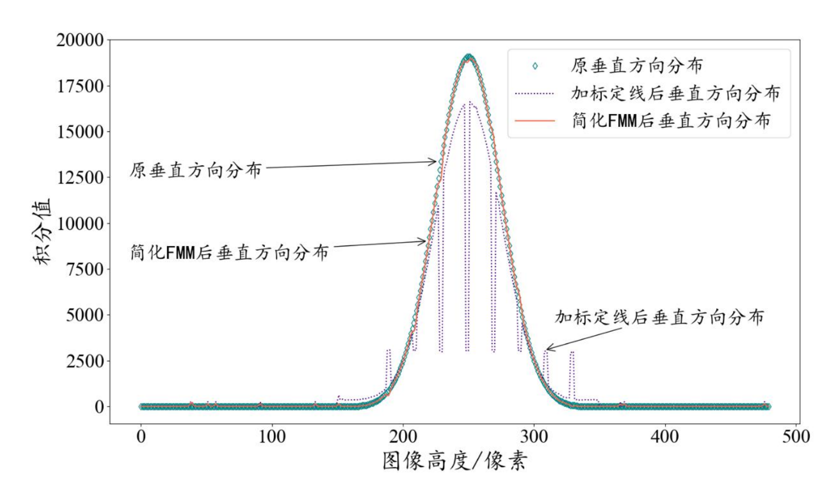


图 7 填充前后垂直方向分布折线图

4 束流剖面参数分析

束流的中心位置和标准差是束流剖面测量的重要参数[16-18]。对于束流而言，其理想的光斑图像的光强分布应符合二维高斯分布分布函数为

$$I(x,y)=A\cdot\exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}+\frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\}+C \tag{4}$$

式中：$I(x,y)$为束流截面(x,y)处的光强，对应图像坐标(x,y)处的像素值；A为束流截面的光强幅值；(x_0,y_0)为光斑中心位置；σ_x，σ_y分别为水平方向和垂直方向的标准差；C为偏置常数。依据二维高斯分布的边缘概率密度特性，对束流图像的水平和垂直方向分别投影获得两方向的一维高斯分布。例如水平方向的分布函数$g(x)$为

$$g(x)=\sum_y I(x,y) \tag{5}$$

同时式 5 满足一维高斯分布，分布函数为

$$g(x)=A_x\cdot\exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right]\right\}+C_x \tag{6}$$

式中：A_x为水平方向的幅值；C_x为水平方向的偏置。LM（列文伯格-马夸尔特，Levenberg- Marquardt）算法[19-20]是一种非线性最小二乘算法，常用的软件，如：Origin、Matlab、LabVIEW 等都采用 LM 算法进行非线性拟合，且 LM 算法提出一种信赖域思想，控制了迭代步长，缩短了迭代时间。本文选择 LM 算法进行高斯拟合求参。在实际测试过程中，由于 LM 算法是局部最优算法，设置的初值对拟合结果影响很大，常常初值设置不合适，导致无法拟合出正确结果。

束流的半高全宽也是束流剖面的重要参数，当束流的形状不规则时，通常实验人员以束流的半高全宽作为束流的剖面参数。经过实验测试，以束流的半高全宽作为拟合的初值可以得到正确的拟合结果。在已知束流某方向的分布函数$g(x)$后，可以在该函数内找到两点x_1和x_2，使式 7 成立。

$$g(x_1) \approx g(x_2) \approx \frac{g_{max} - g_{min}}{2} + g_{min} \tag{7}$$

其中 g_{max} 和 g_{min} 分别是分布函数 $g(x)$ 的最大值和最小值，束流在该方向的半高全宽 δ_x 为

$$\delta_x = |x_1 - x_2| \tag{8}$$

同理可以得到垂直方向的束流半高全宽。束流该方向的标准差 σ 与 δ_x 的关系为

$$\delta_x \approx 2.355\sigma \tag{9}$$

g_{max} 的坐标索引为束流的中心位置，σ 为束流的标准差。表 2，表 3 分别给出了模拟荧光靶图像使用简化 FMM 算法填充标定线前后剖面参数的计算结果和误差数值比较，其中中心位置取四舍五入后的结果，结果显示填充后的计算结果更接近原光斑分布，说明本方法获得的参数计算结果具有较高可信度。

表 2 简化 FMM 算法前后参数对比

算法	中心位置（单位：像素）	垂直方向标准差（单位：像素）	水平方向标准差（单位：像素）
模拟值	(250,300)	25	30
填充前	(250,300)	26.484	32.242
填充后	(250,300)	24.764	29.711

表 3 简化 FMM 算法前后误差对比

算法	位置误差（单位：%）	垂直方向标准差误差（单位：%）	水平方向标准差误差（单位：%）
填充前	0	5.9	7.5
填充后	0	0.9	0.9

5 HIMM 荧光靶图像效果验证

HIMM 现场采集到的荧光靶光斑图像（如图 8）分辨率为 1920x1080，由于安装角度原因，靶片网格由正方形变成了长方形，选取束流中心 4×6 个网格区域的四顶点进行透视变换，透视变换矩阵为[0.5134，-0.03305，-220.8；-0.01668，0.8674，-435.53；0.0000142，-0.000194，1]，变换后图像分辨率为 350x234，如图 9 所示。

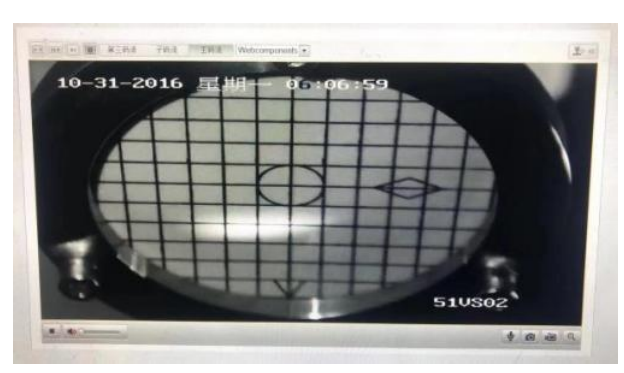


图 8 HIMM 现场采集的荧光靶光斑图

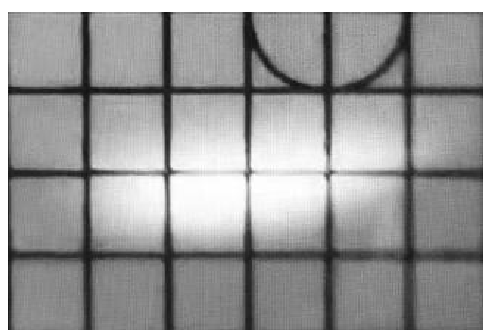


图 9 透视变换后荧光靶光斑图

选取中心 2x4 网格区域交点间连线，以水平方向为例，计算标定线间宽度为 59.3±0.5 个像素，由于标定线间宽度计算存在误差，导致计算标定值时的误差传递，误差传递公式如式 10：

$$\begin{cases} mp = \dfrac{5}{x} \\ \sigma_{mp}^2 = \sigma_{(\frac{5}{x})}^2 = \sigma_x^2 \cdot (\dfrac{\partial mp}{\partial x})_{\bar{x}}^2 \end{cases} \tag{10}$$

式中：mp 为逐像素标定值(单位 mm/pixel)，常数 5 为标定线间宽度和高度差(单位 mm)，σ_{mp} 为逐像素标定值的标准差（单位 mm/pixel），$\bar{x}$ 为两标定线间水平宽度的均值。计算得水平方向逐像素的标定值为 0.084±0.000318 mm/pixel。同理，计算得两标定线间高度为 60.6±0.7 个像素，逐像素标定值为 0.083±0.000426 mm/pixel。透视变换后束流中心位置坐标（162，115）；水平方向标准差为 118.36 个像素即 9.94±0.04mm，垂直方向标准差为 30.66 个像素即 2.54±0.01mm。透视变换后不使用简化 FMM 算法填充标定线，计算的光斑参数为：中心位置坐标（161.86，115.96）；束流水平方向标准差为 99.854 个像素即 8.32mm，垂直方向标准差为 29.02 个像素即 2.42mm。透视变换后采用自适应阈值分割获取标定线掩码图像，如图 10 左图所示。简化 FMM 算法处理后的结果如图 10 右图所示。填充标定线后计算的光斑参数为：中心位置坐标（161.92，115.09）；束流水平方向标准差为 114.89 个像素即 9.58mm，垂直方向标准差为 30.23 个像素即 2.52mm。

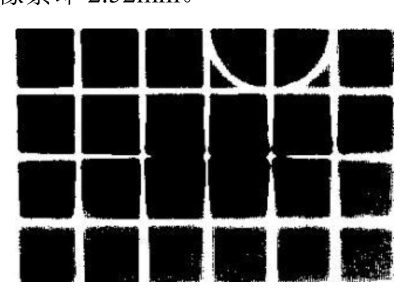
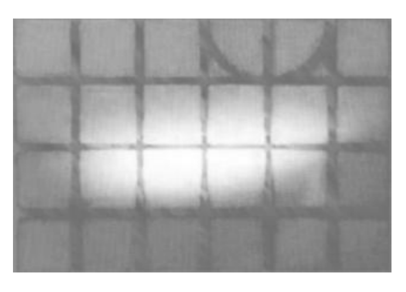



图 10 掩码图（左）、简化 FMM 处理后结果图（右）

综上，简化 FMM 算法填充标定线前后中心位置计算结果近似，对比结果表示，填充后标准差的计算结果更加准确；填充前由于标定线的影响，标准差水平方向的计算误差约为 19.47%，垂直方向的计算误差约为 4.96%；填充后标准差水平方向的计算误差约为 3.76%，垂直方向的计算误差约为 0.79%，计算误差约减少到填充前的 1/4，说明简化 FMM 算法可以有效提高剖面测量精度。但由图 11 可见，简化 FMM 算法填充标定线的结果并不符合人眼主观要求，这是由于本文测试采用的 HIMM 现场荧光靶图像是在开灯条件下拍摄的，荧光靶靶面背景灰度值在 110-180 之间，因此自适应阈值分割算法会将非光斑周围的标

定线提取出来，少部分没有提取出来的标定线周围像素点会在计算填充值时与背景像素进行加和平均，从而影响填充结果。

6 结论

本文根据项目实际需求，将简化 FMM 算法应用在荧光靶束流剖面测量中。模拟和现场测试结果表明，使用简化 FMM 算法去除标定线后的荧光靶图像计算结果与实际结果更接近，计算误差减少了近 3/4，且简化 FMM 算法易于实现，可以提高系统测量的准确度。

参考文献：

[1] SONG Mingtao, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, et al. Rotating Gantry Studies for Heavy Ion Tumor Therapy in Lanzhou[J]. Nuclear Physics Review, 2001, 18(2): 116-119(in Chinese).
(宋明涛，詹文龙，魏宝文，等. 重离子治癌装置研究[J].原子核物理评论，2001，18(2): 116-119. doi: 10.3969/j.issn.1007-4627.2001.02.010)
[2] XIAO Guoqing, ZHANG Hong, LI Qiang, et al. Progresses of Heavy-ion Cancer Therapy in IMP[J]. Nuclear Physics Review, ,2007,24(2):85-88(in Chinese).
(肖国青，张红，李强，等. 中国科学院近代物理研究所重离子束治癌进展[J]. 原子核物理评论，2007，24(2): 85-88. doi:10.3969/j.issn.1007-4627.2007.02.001.)
[3] LIAN Huan, DING Kaizhong, WU Yucheng, et al. Development of the Extraction Reference Point Beam Diagnostic System for Proton Medical Accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, 43(2): 4.(in Chinese)
(连欢，丁开忠，吴昱城，等. 质子医疗加速器引出参考点束流诊断系统的设计与实现[J]. 中国医疗器械杂志，2019，43(2): 102-105.)
[4] HUA Yongxiang, GONG Peirong. Mono-light Beam Position Monitor Based on Fluorescent Screen Online at SSRF[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(4): 404-409.(in Chinese)
(华永祥，龚培荣. 荧光靶单色光位置的实时监测[J]. 核电子学与探测技术，2019，39(4): 6.)
[5] SUN Baogen, LUO Qing, WANG Xiaohui. Recent Developments of Beam Diagnostics[J]. Chinese Physics C(HEP & NP), 2008, 32(z1): 145-147.(in Chinese)
(孙葆根，罗箐，王晓辉. 加速器束流诊断技术的新进展[J]. 中国物理 C（英文版），2008，32(z1): 145-147.)
[6] ZHANG Xia, WANG Yifang, HUANG Xinming. Design of an Automatic Beam Tuning System of Accelerator[J]. Nuclear Physics Review, 2002,19(4):403-406(in Chinese).
(张峡，王义芳，黄新民. 加速器自动调束系统的研究[J]. 原子核物理评论，2002，19(4): 403-406. doi: 10.3969/j.issn.1007-4627.2002.04.008.)
[7] DU Peng, MI Qinglu, ZHOU Jianying, et al. Beam position monitoring system based on EPICS and MATLAB image processing technique[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(10): 735-740. (in Chinese)
(杜鹏，米清茹，周剑英，等. 基于 EPICS/MATLAB 图像处理的光束位置测量系统[J]. 核技术，2012，35(10): 6.)
[8] WANG Kuan. Research and application of HIRFL fluorescent target[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.(in Chinese)
(王宽. HIRFL 荧光靶技术研究及其应用[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所)，2017.)
[9] DONG Jinmei, YUAN Youjin. Beam profile monitor based on image processing technology[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2004, 16(9): 1195-1198. (in Chinese)
(董金梅，原有进. 基于图像处理技术的束流剖面监视系统[J]. 强激光与粒子束，2004，16(9): 1195-1198.)
[10] Castlman K R. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002, 10-26. (in Chinese)
(Casteman K R. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社，2002.)
[11] Bertalmio M, Spairo G, Caseles V, et al. Image inpainting[C] // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 2000: 417-424.
[12] ALEXANDRU TELEA. An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method[J]. Journal of graphics tools, 2004, 9(1): 23-34.
[13] FAN Qian. Image Inpainting based FMM algorithm[D]. Jiangsu. Yangzhou University, 2014. (in Chinese)
(范谦. 基于 FMM 算法的图像修复[D]. 江苏: 扬州大学，2014.)
[14] MIN Xiqing, HUANG Jie. Simplified fast image inpainting method[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(z1): 169-172.(in Chinese)
(闵溪青，黄杰. 简化的快速图像修复方法[J]. 计算机应用，2017，37(z1): 169-172.)
[15] Alain Horé, Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM[C]//20th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2010, Istanbul, Turkey, 23-26 August 2010. IEEE Computer Society, 2010. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.
[16] WANG Lili, HU Zhongwen, JI Huangxin. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(005): 985-990.(in Chinese)
(王丽丽，胡中文，季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. 应用光学，2012，33(005): 985-990.)
[17] ZHANG Chunbo, WANG Qisheng, HUANG Sheng, et al. Real-time analysis technology on the shape of synchrotron radiation beam[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(5): 8.(in Chinese)
(张春波，汪启胜，黄胜，等. 同步辐射光束线束斑形状实时分析技术[J]. 核技术，2015，38(5): 8-15.)
[18] SHI Dashun, TANG Zhaohui. Circular Spot Center Location Method Based on Statis Gaussian Fitting[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(7): 51-56.(in Chinese)
(石达顺，唐朝晖. 基于统计高斯拟合的圆形光斑中心定位方法[J]. 测控技术，2020，39(7): 6.)
[19] TANG Kai. The related research of the measurement system based on optics of HLS II[D]. Anhui: University Of Science And Technology Of China, 2016.(in Chinese)
(唐凯. HLS Ⅱ基于光学的测量系统及其相关研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学，2016.)
[20] Madsen K, Nielsen H B, Tingleff O. Methods for non-linear least squares problems(2nd ed.)[J]. society for industrial & applied mathematics, 2004. doi: 10.1155/2012/312985.

Application of simplified FMM algorithm in beam profile measurement

ZHANG Hongbo[1,2]，WEI Xiaojuan[1,†]，LI Min[2,3,†]，MAO Ruishi[2,3]，TANG Kai[2]，FENG Yongchun[2]

（1.Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China；

2.Institute of Modern Physics，Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract: The fluorescence screen system is used to measure beam transverse profile in the accelerator. In order to further improve the measurement accuracy of the system, this paper proposes a method, filling the orientation lines of fluorescence screen with a simplified Fast Matching Method (FMM), so that the filled fluorescence screen images can reflect the beam profile information more truly. Firstly, the study uses Matlab to generate the simulated fluorescence screen images, and comparative analysis the beam profile parameters of the analog image before and after algorithm processing. The simulation results show that the Structural Similarity Index Measure (SSIM) of the processed simulated image is closer to 1, and the Mean Square Error (MSE) is smaller. Finally, the fluorescence screen images collected by the medical Heavy Ion Medical Machine (HIMM) were used for verification. After processing the fluorescence screen images collected by HIMM, the profile measurement results are close to the evaluation value. The results of this study provide a basis for the FPGA algorithm acceleration of the subsequent beam transverse profile parameter algorithm.

Key words: beam profile measurement; simplified FMM algorithm; fluorescence screen; orientation line filling; image processing

Received date: 26 Jul. 2023; **Revised date:** 4 Nov. 2023

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars of National Natural Science Foundation of China(12205241); Creative Foundation of the Higher Education Institutions of Gansu Province , China(2022B-074); Supported by " the Fundamental Research Funds for the Central Universities" (31920220049 & 31920230138); National Science Fund for Distinguished Young Scholars(11905075)

†**Corresponding author:** WEI Xiaojuan，E-mail: 258543923@qq.com； LI Min，E-mail: limin@impcas.ac.cn